

вимірювання дозволяє суттєво зменшити вплив температури, тиску та складу газового середовища на точність контролю.

Література: 1. Патент України на корисну модель 32894 МКВ G 01 F 23/28. Ультразвуковий рівнемір / Рябіченко А.В., Стенцель Й. І.; Заявл. 10. 12. 2007; Опубл. 10.06.2008. Бюл. 11. 2. Стенцель Й.І., Томсон А.В., Рябіченко А.В. Математичне моделювання ультразвукових рівномірів на основі теорії реологічних переходів. Матеріали другої всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції „Актуальні проблеми сучасної науки”. – Київ: 2006. – с.78-81. 3. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

УДК 620.179.14

Б.М. ГОРКУНОВ, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
Н.Н. СИРЕНКО, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.А. ТИЩЕНКО, асп., НТУ "ХПИ"

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

У роботі запропоновано теоретичну модель вихорострумового перетворювача прохідного типу з ферромагнітним зразком представленим у вигляді соленоїда з геометрією витка еквівалентною глибини проникнення електромагнітного поля. Отримано вирази для визначення складових комплексного опору котушки перетворювача та просторовий розподіл еквівалентного опору перетворювача зі зразком.

In the work the theoretical model of bobbin probe type eddy current converter with the ferromagnetic sample represented as a solenoid with geometry of coil to the equivalent depth of penetration of the electromagnetic field is offered. Expressions are got for determination of constituents of complex resistance of bobbin of converter and spatial distributing of equivalent resistance of converter with a sample.

Введение. Для надежного контроля и эффективного диагностирования поверхностного состояния металлических конструкций широко применяется вихретоковый бесконтактный метод неразрушающего контроля. В основе данного метода лежит взаимодействие внешнего по отношению к объекту контроля намагничивающего электромагнитного поля с индуцированными в материале объекта вихревыми токами. Вихретоковый метод контроля постоянно развивается и является весьма перспективным, поскольку обладает рядом существенных преимуществ в силу отсутствия необходимой подготовки поверхности изделия, высокой скорости и автоматизации процесса контроля, возможностью контроля через защитные поверхности и т.д. [1].

Несмотря на достаточное развитие теоретических и прикладных аспектов современных методов и средств вихретокового неразрушающего контроля, надежных и эффективных средств получения и обработки экспериментальных данных в настоящее время не существует.

Иными словами, определение функциональных зависимостей между состоянием объекта и сигналами преобразователя, а также восстановление параметров дефекта или структуры объекта по измеренным данным разработаны слабо в силу большой сложности и многозначности задачи [2].

Надежный метод получения результатов должен опираться на разработанную математическую модель, адекватно описывающую процесс получения экспериментальных данных. Математическую модель можно описать как аналитически, так и численными методами.

Постановка задачи. Основным элементом, преобразующим физические явления в электрический сигнал, при вихретоковом контроле является вихретоковый преобразователь (ВТП). При проектировании ВТП всегда возникает задача определения распределения электромагнитного поля в преобразователе, объекте контроля и окружающем пространстве. Аналитические методы решения подобных задач для определения поля в областях с простой геометрией и однородной средой подробно рассмотрены в [3]. При существенной неоднородности среды целесообразно воспользоваться методами граничных интегральных и пространственных интегральных уравнений [4,5]. Применение перечисленных методов при проектировании ВТП позволяет успешно находить распределение электромагнитного поля в объекте со сложной геометрией и нелинейными свойствами с достаточно высокой точностью, но при больших затратах машинного времени. На данный момент в современных исследованиях в области вихретокового контроля основной упор сделан на совершенствование алгоритмов расчетных операций, направленных на сокращение временных затрат [6]. Эффективность численных методов расчета оценивается по конечным параметрам: точности и производительности программного продукта, простоте реализации. Это, в частности, можно достичь при создании упрощенных моделей ВТП с исследуемым образцом за счет конкретизации параметров контроля объекта и ограничении диапазонов контроля.

Основная часть. Рассмотрим простейшую модель кольцевого витка (см. рис. 1) с поперечным сечением в виде окружности.

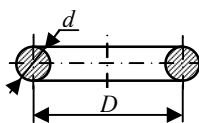


Рис. 1. Схематичное изображение одного витка с поперечным сечением в виде окружности.

Найдем собственную индуктивность кольцевого проводника намагничивающей обмотки диаметра D . Для этого воспользуемся формулой для расчета индуктивности кругового кольца проводника кругового сечения [7]:

$$L = \mu_0 \frac{D}{2} \left(\ln \frac{8D}{d} - 2 + \frac{\zeta}{4} \right), \quad (1)$$

где D – диаметр кольца (по осевой линии провода);

d – диаметр поперечного сечения провода;

ζ – величина, значение которой определяется в зависимости от значений параметра kr , причем $kr = \sqrt{\omega \mu \sigma}$,
 $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота возбуждающего тока; $\mu = \mu_0 \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость вещества; σ – удельная электрическая проводимость вещества; μ_r – относительная магнитная проницаемость вещества;
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Для определения ζ при $kr < 2$ можно пользоваться формулой:

$$\zeta = 1 - \frac{1}{6}x^4 + \frac{13}{270}x^8 \dots, \quad (2)$$

а при $kr > 5$ – формулой:

$$\zeta = \frac{1}{x} - \frac{3}{64x^3} - \frac{13}{270x^4} \dots, \quad (3)$$

где $x = \frac{kr}{2\sqrt{2}}$.

Формула верна при любой частоте с точность до членов порядка $\left(\frac{d}{D}\right)^2$.

Активное сопротивление витка определяется по формуле:

$$R_i = 4\rho \frac{D}{d^2}. \quad (4)$$

Для нахождения взаимных индуктивностей рассмотрим случаи коаксиальных круговых контуров одинаковых и неодинаковых диаметров (см. рис. 2 а, б) соответственно, которые расположены друг относительно друга на расстоянии y и для одинаковых сечений проводников.

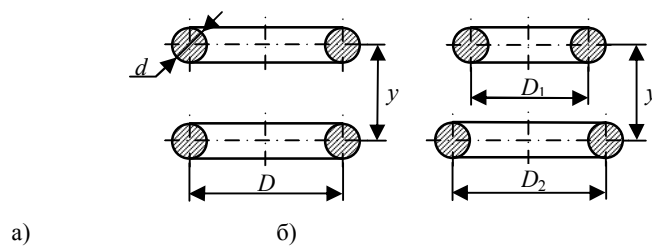


Рис. 2. Коаксиальные круговые контуры с одинаковыми а) и неодинаковыми б) диаметрами.

Взаимная индуктивность коаксиальных круговых контуров одного диаметра, расположенных близко друг к другу, рассчитывается по формуле [7]:

$$M_1 = \mu_0 \frac{D}{2} \left[\left(1 + \frac{3}{4}\xi^2 - \frac{15}{64}\xi^4 + \frac{35}{256}\xi^6 + \dots \right) \ln \frac{4}{\xi} - 2 - \frac{1}{4}\xi^2 + \frac{31}{128}\xi^4 - \frac{247}{1536}\xi^6 + \dots \right], \quad (5)$$

$$\xi = \frac{y}{D}, \quad (6)$$

Для расчета взаимной индуктивности коаксиальных круговых контуров с неодинаковыми диаметрами (см. рис. 2, б) воспользуемся формулой представленной в виде бесконечного ряда [7]:

$$M_2 = \frac{\mu_0 \pi \sqrt{D_1 D_2}}{\sqrt{2(1+q)}} q^{3/4} \left[1 + \frac{1}{4}q^2 + \frac{9}{64}q^4 + \dots + A_n q^{2n} + \dots + \frac{1}{2}q + \frac{3}{16}q^3 + \dots + \frac{2n+1}{2(n+1)} A_n q^{2n+1} + \dots \right], \quad (7)$$

где

$$A_n = \left[\frac{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1)}{2 \cdot 4 \cdot 6 \dots 2n} \right]^2; \quad (8)$$

$$q = k_2 = \frac{1 - k_1'}{1 + k_1'}, \quad (9)$$

$$k_1'^2 = 1 - k_1^2, \quad (10)$$

где k_2 – модуль полных эллиптических интегралов первого и второго рода K_2 и E_2 .

$$k_1 = \frac{1 - k'}{1 + k'}, \quad (11)$$

где k_1 – модуль полных эллиптических интегралов первого и второго рода K_1 и E_1 .

$$k'^2 = 1 - k^2, \quad (12)$$

$$k^2 = \frac{4D_1D_2}{(D_1 + D_2)^2 + 4y^2}, \quad (13)$$

где k – модуль полных эллиптических интегралов первого и второго рода K и E .

Для выбора значения циклической частоты ω электромагнитного поля зададимся диаметром сечения витка эквивалентной трубки вихревого тока, равным глубине проникновения поля δ , тогда

$$\omega = \frac{2}{\delta^2 \mu_0 \mu_r \sigma}. \quad (14)$$

Составляющую комплексного сопротивления для витка преобразователя найдем по формуле:

$$Z_{\text{экв}} = R_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} + j\omega M_{\text{экв}}, \quad (15)$$

где $R_{\text{экв}}$, $L_{\text{экв}}$ – активное сопротивление и индуктивность витка обмотки вихретокового преобразователя;

$M_{\text{экв}}$ – сумма всех взаимных индуктивностей, которая учитывает взаимодействие одного витка обмотки ВТП со всеми условными витками образца и со всеми витками обмотки преобразователя.

Для примера рассмотрим модель вихретокового преобразователя, состоящего из пяти горизонтальных витков, с цилиндрическим образцом. Образец представляет собой соленоид, разбитый на элементарные витки, диаметр сечения которых равен δ . Данная модель может быть проиллюстрирована с помощью рис. 3.

Для того, чтобы произвести расчет модели вихретокового преобразователя зададим параметры модели. Параметры обмотки: диаметр витка $D_1 = 14$ мм; диаметр провода $d = 0,1$ мм (с учетом изоляции диаметр провода $d = 0,12$ мм); материал витка – медь, удельная электрическая проводимость $\sigma = 5,8 \cdot 10^7$ См/м. Параметры образца: диаметр образца $D_2 = 10$ мм; длина образца $l = 50$ мм. В расчетах будем использовать образцы, изготовленные из стали Ст. 45 с характеристиками $\mu_r = 80$; $\sigma = 0,47 \cdot 10^7$ См/м и стали X18H10T с характеристиками $\mu_r = 1,5$; $\sigma = 0,14 \cdot 10^7$ См/м. Расчет значений $Z_{\text{экв}i}$ проведем для глубин проникновения $\delta = 0,3$ мм; $\delta = 0,4$ мм и $\delta = 0,5$ мм.

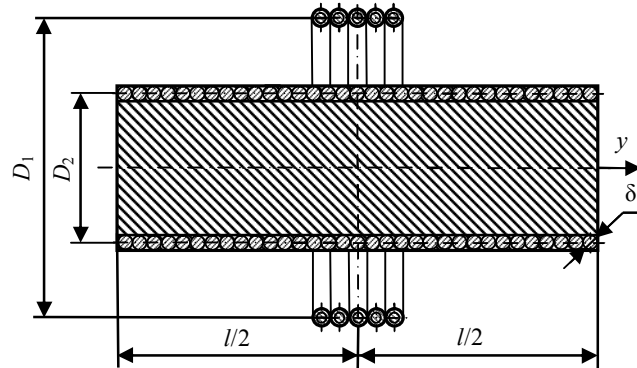


Рис. 3. Расчетная модель ВТП, состоящего из пяти горизонтальных витков, и цилиндрического образца.

На рис. 4 и 5 представлены графики зависимости Z^* от расположения витков образца относительно витков катушки для разных материалов с разными глубинами проникновения, где Z^* определяется из соотношения:

$$Z^* = \frac{Z_{\text{экв}}}{Z_0}, \quad (16)$$

$$Z_0 = R_0 + j\omega L_0, \quad (17)$$

где $R_0 = 4\rho W \frac{D_1}{d^2}$ (W – количество витков ВТП).

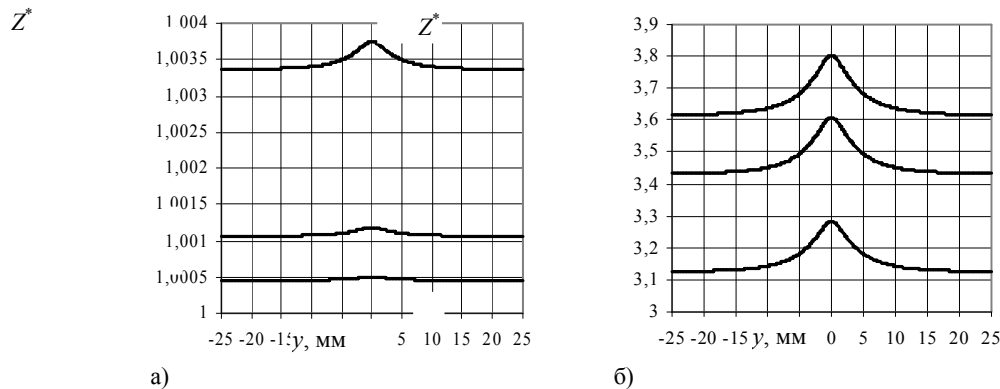


Рис.4. Графики зависимости Z^* от расположения элементарных витков образца относительно витков катушки для стали Ст.45 а) и стали X18H10T б) на разных глубинах проникновения: 1. $\delta = 0,3$ мм; 2. $\delta = 0,4$ мм; 3. $\delta = 0,5$ мм.

Заключение. Данная математическая модель позволяет оценить изменение эквивалентного сопротивления ВТП с различными образцами и при различных режимах его работы. Так, например, если зафиксировать для известного материала частоту зондирования, то можно рассчитать изменение $Z_{экв}$ в зависимости от изменения характеристик μ_r и σ на глубине δ при поверхностном упрочнении материала.

Список литературы: 1. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. Под общ. ред. В.В. Клюева. Т.2: В 2 кн.-М.: Машиностроение, 2003.-688 с. 2. Гальченко В.Я. Информационные модели в теории и практике электромагнитной дефектоскопии. – Луганск: Издательство Восточноукраинского государственного университета, 1997. – 262 с., ил. 3. Гринберг Г.А. Избранные вопросы математической теории электрических и магнитных явлений. М.-Л: Издательство АН СССР, 1948. – 727 с. 4. Тозони О.В., Маергойз И.Д. Расчет трехмерных электромагнитных полей. Киев: Техніка, 1974. – 352 с. 5. Курбатов П.А., Аринчин С.А. Численный расчет электромагнитных полей. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 168 с. 6. Луний В.П. Двухшаговый алгоритм конечно-элементного решения задач электромагнитного контроля. Вихретоковый контроль. Дефектоскопия, №12, 2006., С. 62-69. 7. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1955. – 368 с.

УДК620.179.14

МИРОШНИКОВ В.В., д-р техн. наук, проф., ВНУ им. В. Даля, Луганск. **КРАСНЯКОВ О.Л.**, асп., ВНУ им. В. Даля, Луганск.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОНВЕЕРНОГО МЕТАЛЛОДЕТЕКТОРА

Надана методика розрахунку основних параметрів металодетектору в залежності від розміру поля збудження та поля, створеного металевими включеннями.

The method of calculation of basic parameters metal-detector is offered depending of the value of the exciting field and field, which created the metallic inclusions.

В процессе добычи и переработки сыпучих материалов, к которым можно отнести большой ряд материалов от угля, щебенки до зерна и сахара, они засоряются металлическими включениями (МВ). МВ это детали, элементы конструкций и инструментов, с помощью которых добывается, транспортируется и перерабатывается данный материал. По статистической оценке от 87% до 92% МВ, выявляемых в сыпучих материалах, являются ферромагнитными. Для их извлечения, и тем самым для защиты технологического оборудования, широко используются различные типы железоотделителей. Железоотделитель представляет собой П-образный электромагнит, габаритные размеры которого определяет ширина транспортной ленты (от 500 мм до 2000 мм) и извлекающая способность, т. е. величина создаваемого им магнитного поля. Потребляемая мощность железоотделителей колеблется от 600 до 15000 Вт, что при круглосменной работе позволяет отнести это оборудование к высокоэнергоёмким. Естественно, возникает задача о снижении энергозатрат путем кратковременного включения железоотделителя в момент прохождения МВ в потоке материала.

Проведенные исследования на горно-обогатительной фабрике показали, что при суточном объеме переработки угля 8,3 тыс. тонн частота выявления металлических включений составляет 20–30 случаев. Масса выявленных МВ распределяется следующим образом: 0,1...1,0 кг – 45%; 1,0...4,0 кг – 15%; 4,0...10 кг – 30% и свыше 10 кг – 10%. При месячном объеме производства в 250 тыс. тонн угля масса выявляемых МВ составляет 1,3...1,5 тонн.

Приведенные выше данные показывают, что железоотделитель является необходимым элементом технической безопасности технологического оборудования и в то же время имеется возможность уменьшить его энергопотребление.

Учитывая периодичность появления МВ железоотделитель целесообразно держать в "теплом" состоянии, т. е. на 5...10% от полной мощности и включать на полную мощность только при обнаружении МВ.